

Title	Theoretical research on phase dynamics and information processing of neuronal rhythmical networks(Abstract_要旨)
Author(s)	Terada, Yu
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2017-03-23
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k20512
Right	許諾条件により本文は2018-03-22に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	寺田 裕
論文題目	Theoretical research on phase dynamics and information processing of neuronal rhythmic networks（リズムを有する神経ネットワークの位相のダイナミクスと情報処理に関する理論的研究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文ではリズムを持つ神経細胞で構成されるようなネットワークのダイナミクスと情報処理に関する解析を位相縮約理論に基づき行った研究結果を示している。</p> <p>第1章では、自然界に存在するリズム現象や同期現象を解説し、研究の背景にある脳神経系に関わる振動現象について述べている。さらに、リズム現象を理論的に扱う際の力学系の概説と本論文の構成について述べている。</p> <p>第2章では、位相振動子モデルを概説している。特に、位相縮約、同期転移、Ott-Antonsen ansatz について詳しく説明している。</p> <p>第3章では、標準的な結合位相振動子モデルである蔵本モデルを扱っている。蔵本モデルの解析では、解析の扱いやすさのために自然振動数の分布に対称性を仮定している場合が多い。本研究では非対称な自然振動数分布を持つ蔵本モデルを考え、蔵本モデルが示す同期転移を解析的に調べている。系を解析する際には、素子数無限大の極限を考え、Ott-Antonsen ansatz を用いて系の集団的挙動を表す少数自由度微分方程式を得ている。解析の結果、従来の研究では見られなかった非標準的な転移現象が現れることを示している。さらに得られた分岐図を用いて蔵本モデルにおける自然振動数分布の非対称性の役割を議論している。</p> <p>第4章では、結合振動子系において自然振動数分布が集団によって大きく異なり、1で無い整数比の同期現象が生じるような状況を考えている。このような状況では、位相縮約理論によれば特有の結合関数を用いる必要があることが示されている。解析の際には、Ott-Antonsen ansatz を適用するために特定の相互作用にある仮定をおき、計算に工夫をしているが、この仮定を外した数値計算でも質的に同様の結果が成立することも示している。1つの結果として、クラスター化した集団と非同期的な集団が共存するクラスター化キメラ状態と呼ばれる状態が現れることを示した。これは従来の研究では見られていなかった結果である。</p> <p>後半の研究では、ダイナミクスと系が行う情報処理の関係に着目し、ノイズのある結合位相振動子系の研究を行っている。</p> <p>まず第5章では、第6章における研究の準備のために位相変数のような周期的な変数を用いて情報理論を概説している。</p> <p>第6章では、結合振動子系のダイナミクスと系が行っている情報のやり取りに関して調べるために、情報理論に基づく量である移動エントロピーを導入している。本研究では、経路積分表式を用いた定式化によって、1対の結合位相振動子系の移動エントロピーの表式を導出している。これにより結合振動子系においては、位相差が一様分布になるような解を安定化する結合関数の形のときに、移動エントロピーが最大になることを示している。</p> <p>第7章では、本研究全体の結論を述べており、非線形動力学および理論神経科学における本研究の重要性と本研究が示唆するこれらの分野の研究の今後の発展の可能性について述べられている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、神経系を含む様々な生物学・物理学・化学・工学的な系において、多数の振動子が協調することで同期現象を引き起こすシステムを調べた研究成果を示している。多くの場合、現実の系は単一の振動子でさえ大自由度高次元力学系であり、理論解析が事実上不可能になることが多い。一方、位相縮約理論に従えば、本質的な自由度である位相に着目することで、大自由度力学系を扱いやすい低自由度の位相振動子系へと縮約することができる。本論文では、まずこの位相縮約理論に基づき、今まで十分に解析されていなかった以下の2つのクラスに属する系のダイナミクスを解析している。

(1) 結合した位相振動子系で最も標準的なモデルである蔵本モデルにおいて、非対称な自然振動数分布をもつ場合を考え、同期転移を解析的に調べている。その結果、従来の研究では見られなかった特殊な転移現象、すなわち連続転移の後に不連続転移が現れることを示し、これが自然振動数分布の非対称性によって生じるものであることを示している。自然振動数分布の非対称性の影響を解析的に議論した例は少なく、今後のこの種の議論の出発点になる結果であり評価できる。

(2) 自然振動数分布の平均が大きく異なるような2集団の振動子系において、整数比の同期現象が生じる場合に関して理論的に解析している。脳神経系では、このような複数リズム間の相互作用が高次の認知機能に関わっていることが示唆されているが、理論的な解析は十分行われていない。特に、振動子間の自然振動数が大きく異なるときには特有の結合関数が理論的に導出されることが知られているが、このタイプの結合関数を正しく用いた数理モデルの解析はほとんど報告例が無い状況である。本研究では、系のダイナミクスを系統的に調べることで、クラスターの総数が3個以上となるクラスター化キメラ状態が出現することを新たに示しており、興味深い結果である。

また、最後の研究では、結合振動子系のダイナミクスに関して情報理論的観点から移動エントロピーを用いて解析をおこなっている。移動エントロピーは片方の素子の現在の状態がもう一方の素子の未来の状態へどの程度寄与しているかを定量化している量であり、経路積分を用いた定式化によって解析的結果を得ることに成功している。これにより、特定の結合関数形のときに移動エントロピーが最大になることが示されている。この研究はやや荒削りで、今後もう少し系統的な精査が必要であるが、ダイナミクスと情報の関係に関する理論的な議論は重要であり、その第一歩として評価できる結果である。

上記の研究内容は、脳波の解析など現実の系で近年必ず直面する課題であるが、十分な研究結果がこれまで無かった。その意味で、実験的観点からの価値も認められる。結論として、本論文は、博士(情報学)の学位論文として、価値あるものと認める。また、平成29年2月13日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。

注) 論文審査の結果の要旨の結句には、学位論文の審査についての認定を明記すること。
更に、試問の結果の要旨(例えば「平成 年 月 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。」)を付け加えること。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。
要旨公開可能日: 年 月 日以降